Revista Internacional de
Ingeniería
de Estructuras.

Vol. 22, 2, 227-249 **(2017)**

DISEÑO DE CONTRAVIENTO Y PLACAS GUSSET DE CONEXIÓN PARA SOPORTAR DISIPADORES DE ENERGÍA

UPWIND AND CONNECTION PLATES GUSSET DESIGN TO SUPPORT ENERGY DISSIPATORS

Roberto Aguiar[1,2], Fernando Del Castillo[2], Verónica Ávila[2], Henry Coyago[1], Atalo Cedeño[2]

[1]Departamento de Ciencias de la Tierra y la Construcción
Universidad de Fuerzas Amadas ESPE
Av. Gral. Rumiñahui s/n, Sangolquí. Quito, Ecuador
Correo Electrónico: rraguiar@espe.edu.ec

[2]Facultad de Ingeniería
Universidad Laica Eloy Alfaro de Manabí
Av. Circunvalación. Manta

RESUMEN

Una forma de reforzar estructuras es mediante contravientos de acero en forma de V invertida, sobre los cuales puede o no ir disipadores de energía. En este artículo se presenta el marco teórico para el diseño de las Placas Gusset, superior e inferior, que sirven para transmitir las cargas de las diagonales del contraviento a las columnas y vigas de la estructura. De igual manera se presenta el marco teórico para diseñar las diagonales de acero del contraviento, considerando que estas trabajan únicamente a tracción o compresión.

Para facilitar el cálculo, se presenta el uso de varios programas de computación desarrollados en Excel.

Palabras Claves: Reforzamiento con contravientos; Placas Gusset; Disipadores de Energía.

OVERVIEW

One way of reinforcing structures is through inverted V-shaped steel windbreaks, on which energy dissipators may or may not be put. This article presents the theoretical framework for the design of Gusset plates, both top and bottom, which serve to distribute loads of the upwind diagonals to the structure's columns and beams, as well as the theoretical framework for designing the diagonals of the upwind steel, considering that they only work under traction or compression.

To facilitate calculation, we used various computer programs developed in Excel.

Recibido: Marzo de 2017
Aceptado: Abril de 2017

Finally, this article describes the reinforcement of a 16-story structure with TADAS energy dissipators, including the computation of bays in a building.

Key words: Reinforcement with windbreak; Gusset plates; Energy dissipators.

1. INTRODUCCION

El 16 de abril de 2016, se manifestó una realidad de la gran vulnerabilidad que tienen las estructuras del Ecuador, cuando un terremoto de magnitud 7.8, causó gran daño en las provincias cercanas al proceso de ruptura de este sismo, que fueron las Provincias de Manabí y Esmeraldas. Si se registra un movimiento telúrico de magnitud comprendida entre 6 y 6.5 y que esté asociado a las fallas ciegas de Quito, igual se tendrá un gran daño en las estructuras, especialmente en las que fueron diseñadas en el siglo pasado. Aguiar *et al.* (2011)

Retomando al terremoto de 2016, en la figura 1, se presenta la longitud de ruptura del terremoto de 1906 y su epicentro que tuvo una magnitud de 8.8, que es uno de los más grandes registrados a nivel mundial y en ella se aprecia que se han registrado otros sismos en esa área de ruptura como son los registrados en 1942 (7.8), 1958 (7.7); 1979 (8.2) y 2016 (7.8); y con diferentes colores se indica el grado de acoplamiento que se tiene en las asperezas debido al incesante movimiento de la placa de Nazca en dirección Norte-Este a una velocidad estimada de 47 mm, por año. Dicho sea de paso, en la costa norte del Ecuador se da una mayor cantidad de sismos con respecto a las costa sur.

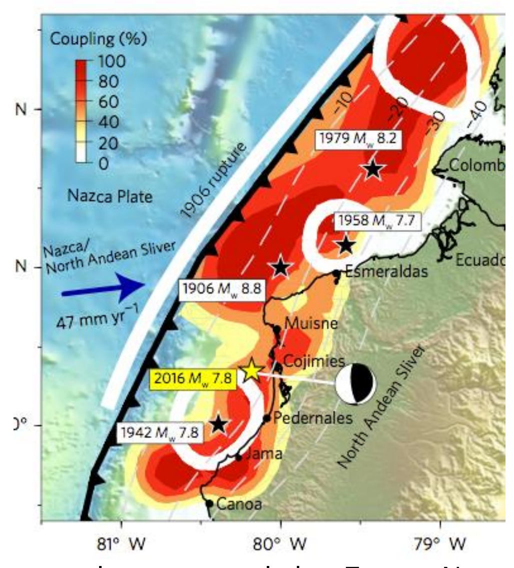


Figura 1 Segmentos altamente acoplados. Fuente: Nocquet *et al.* (2016)

Es importante estar conscientes de la gran peligrosidad sísmica que se tiene en el Ecuador, de la responsabilidad de los Proyectistas Estructurales de reforzar en forma adecuada, las estructuras que fueron afectadas por el terremoto de 2016 y la necesidad de reforzar estructuras situadas en otras regiones del País.

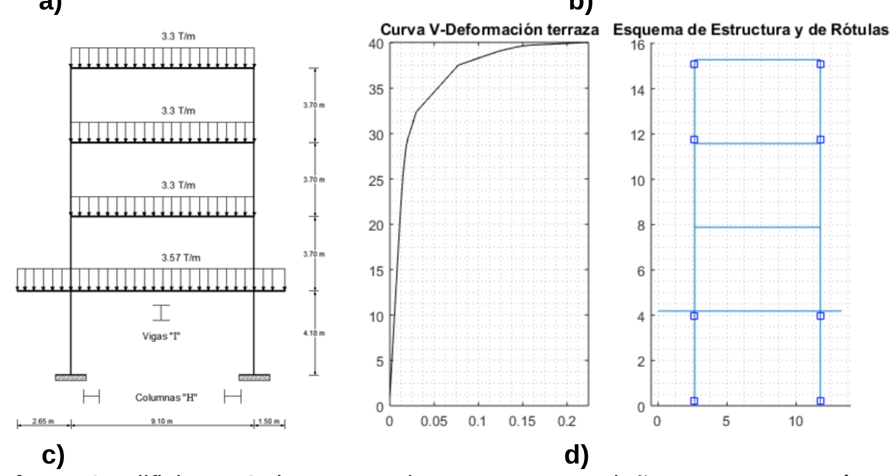
La mayor parte de las estructuras de Manta, que fueron afectadas por el terremoto de 2016, han sido reparadas, pero no reforzadas y esto es preocupante ya que a futuro se tendrán nuevos sismos de menor, igual o mayor magnitud; y las estructuras que no fueron reforzadas están “sentidas” y volverán a dañarse.

Pocos son los casos, de estructuras públicas de Manta en que se estén realizando labores de reforzamiento a un año del terremoto, entre ellas se destaca el Edificio del Banco Central (Aguiar *et al.* 2016, 1), que están reforzando con la incorporación de muros de corte, no se presenta más información porque el artículo está orientado a las estructuras en las cuales han colocado contravientos de acero y una de ellas es la Unidad de Vigilancia Comunitaria, UVC.

En la figura 2 a, se aprecia cómo quedó el Edificio de vivienda de la UVC de Manta, luego del terremoto, hubo gran daño en la mampostería de la planta baja; no se apreció daño en la mampostería de los pisos superiores. (Aguiar *et al.* 2016, 1) y esto se debió a que la mampostería no estaba confinada. En la figura 2 b, se observa la configuración estructural; en el sentido transversal se tiene dos ejes de columnas (en la parte opuesta que no se ve se tiene tres ejes de columnas) lo cierto es que existen dos voladizos en la losa de la plata baja y la fotografía de la figura 2 a, corresponde a uno de ellos.



a)   **b)**



c)   **d)**

Figura 2 Edificio UVC de Manta; a) Estructura con daño en mampostería; b) Configuración Estructural; c) Pórtico Tipo; d) Curva de capacidad sísmica resistente de pórtico tipo.

En la figura 2 c, se presenta un pórtico transversal, las columnas son tipo “H” y las vigas tipo “I”. En la figura 2 d, se muestra la curva de capacidad resistente del pórtico tipo y se aprecia que las rótulas plásticas se forman en las columnas de cabeza y pie, del primero y cuarto piso. Esto significa que la estructura no fue diseñada con el criterio de columna fuerte-viga débil.

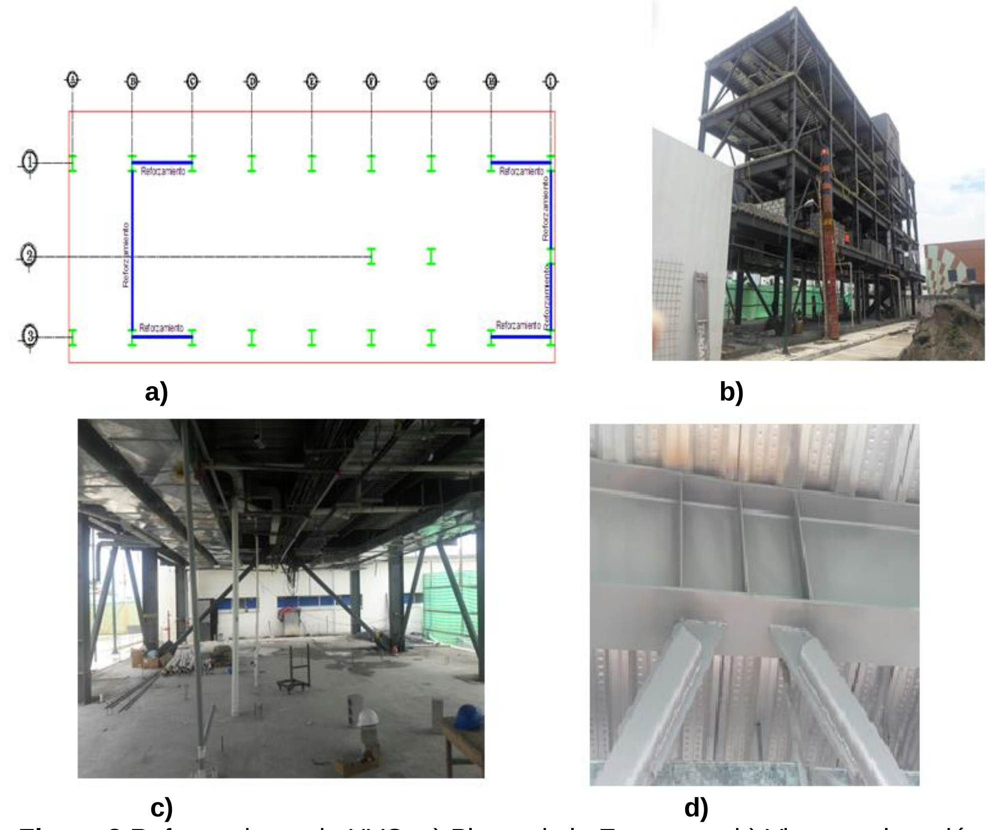


Figura 3 Reforzamiento de UVC; a) Planta de la Estructura; b) Vista en elevación en que se aprecian los contravientos; c) Contraviento en planta baja; d) Placa Gusset superior y placas de continuidad en el alma de la viga.

Decidieron reforzar el edificio UVC de Manta, con contravientos de acero, colocados en los dos sentidos (ver figura 3 a) y en todos los pisos (figura 3 b), de esta manera se rigidiza notablemente a la estructura y la preocupación del primero de los autores de este artículo es que no reforzaron la cimentación (cuando se colocan contravientos a secas se transmite gran carga a la cimentación).

En Aguiar *et al.* (2016, 1) se reforzó la estructura del UVC de Manta, colocando disipadores de energía TADAS y no en todos los pisos, esta forma de reforzamiento es adecuada para estructuras flexibles que tuvieron daño a nivel de mampostería. Lo que se consigue es incrementar el amortiguamiento de la estructura y la rigidez se incrementa ligeramente lo que implica que las fuerzas que las diagonales transmiten a las vigas, columnas y cimentación son bajas.

En la figura 3 c, se aprecia los contravientos en forma de V invertida colocados en la planta baja y en la figura 3 d, se presenta dos placas de unión de las diagonales con la viga. (Este reforzamiento no fue propuesto por Aguiar *et al.* 2016, 1).

2. PLACAS GUSSET

Este es el tercer artículo que escribe el primero de los autores, sobre Placas Gusset. En efecto, en Aguiar *et al.* (2016, 2, 3) se presenta el diseño, uso de un programa de computación y el sistema constructivo, para una Placa Gusset inferior en que se utiliza una placa empernada entre la diagonal y la Placa. Ahora se trabaja con una diagonal que tiene un elemento tubular hueco, el mismo que se introduce en la Placa para luego ser soldado, en una longitud L_1, su colocación es muy sencilla. En los anteriores trabajos no se analizó la Placa Gusset superior, que se lo hace en este artículo.

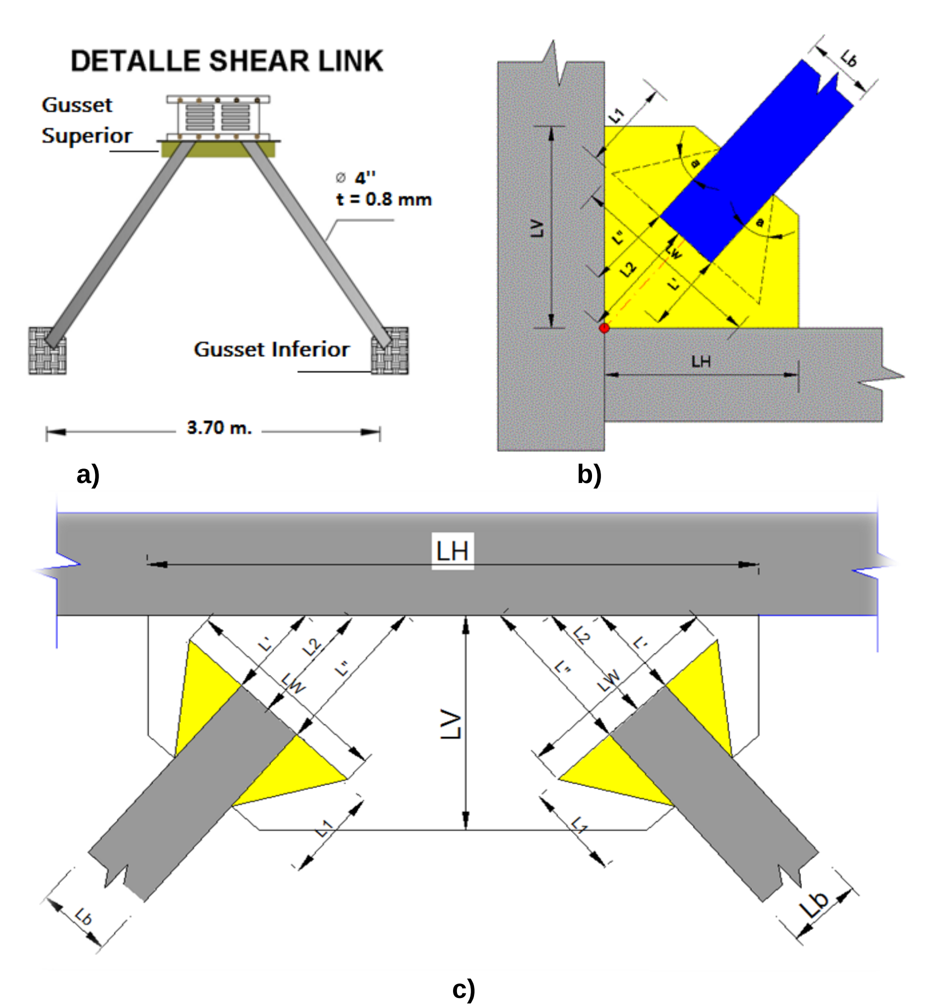


Figura 4 a) Contraviento en forma de "V" invertida e identificación de Placas Gusset; b) Placa Gusset inferior y nomenclatura; c) Placa Gusset superior.

En la figura 4 a, se presenta un contraviento en forma de “V” invertida sobre el cual se ha colocado un disipador Shear Link, el marco teórico que se indica a continuación, es independiente de la existencia o no del disipador; en 4 a, se indica la placa Gusset inferior que permite la transferencia de cargas de la diagonal a la columna y viga de la estructura y la placa Gusset superior, que en este caso va unida al disipador.

El disipador de energía, va sobre una placa horizontal y la Placa Gusset superior es perpendicular a la placa horizontal; en la figura 4 b, se indica la placa inferior con la nomenclatura que se utiliza para el diseño y en la figura 4 c, se muestra la placa superior. Para las dos placas, el marco teórico que se indica a continuación, es el mismo que comprende el cálculo de: i) Resistencia a Tensión; ii) Resistencia a Cortante Vertical; iii) Resistencia por Bloque de Cortante; iv) Resistencia a la Compresión; v) Soldadura, aplicando el Método LRFD (Load Resistance Factor Design) del AISC (2010)

2.1 Resistencia a la Tensión

La capacidad a tensión se comprueba con las siguientes ecuaciones.

$$\mathrm{A_w} = \mathrm{L_w}\, \mathrm{t_p} \qquad (1)$$

$$\emptyset\, \mathrm{R_n} = \emptyset\, F_y\, A_w \qquad (2)$$

Donde A_w es el área de la sección de la placa Gusset; L_w es el ancho de la sección Whitmore; t_p es el espesor de la placa; F_y es el mínimo esfuerzo de fluencia especificado; ∅ factor de diseño el cual es 0.9 para diseño LRFD; $\emptyset\, R_n$ es la fuerza de diseño (Capacidad). En la figura 4 b y c, se indica la longitud L_w la misma que se calcula en función del ángulo a que define el trapecio de presiones del modelo de Whitmore, un valor recomendado es $a = 30^0$ (Dowswell 2011, Kotulka 2007).

2.2 Resistencia a Cortante Vertical

De acuerdo al AISC 360-10, Capítulo J, Sección 4-3, se tiene que el factor $\emptyset = 1$.

$$A_{gv} = (L_1 + L_2) * t_p \qquad (3)$$

$$\emptyset\, R_n = 0.6\, F_y\, A_{gv} \qquad (4)$$

Las longitudes L_1, L_2, están indicadas en la figura 4; t_p es el espesor de la placa Gusset. A_{gv} es el área bruta al cortante.

2.3 Resistencia por bloque de cortante

La fluencia al cortante y fractura a tensión viene dada, por:

$$\emptyset R_n = \emptyset[0.6\, F_y\, A_{gv} + F_u\, A_{nt}] \quad (5)$$

La fluencia a tensión y fractura a cortante, viene dada, por:

$$\emptyset R_n = \emptyset[0.6\, F_u\, A_{nv} + F_y\, A_{gt}] \quad (6)$$

Donde A_{nt} es el área neta a tensión; A_{gt} es el área bruta a tensión; A_{nv} es el área neta a cortante; A_{gv} es el área bruta a corte; $\emptyset$ es el factor de minoración de esfuerzos por fractura a tracción, $\emptyset = 0.75$; F_u es el esfuerzo último del material.

$$A_{nt} = L_b\, t_p$$

Donde L_b es el diámetro del tubo, ver figura 4. Por otro lado, en este caso se cumple que $A_{gt} = A_{nt}$.

La capacidad por bloque de cortante, viene dada por la menor de las ecuaciones (5) y (6).

2.4 Resistencia a la compresión

La longitud necesaria para la resistencia al pandeo se calcula en base a la ecuación (7), en la figura 4 b y c, se indica el significado de cada una de las variables.

$$L_g = \frac{L' + L_2 + L''}{3} \quad (7)$$

La sección transversal con la que se verifica la compresión, tiene un ancho L_w (Longitud de Whitmore) y una altura t_p. De tal manera que:

$$I_g = \frac{L_w\, t_p^3}{12}$$

$$A_g = L_w * t_p$$

$$r = \sqrt{\frac{I_g}{A_g}}$$

Donde I_g, A_g son el momento de inercia y el área de la sección transversal; r es el radio de giro; el factor de longitud efectiva K, se halla de la siguiente manera.

(8)

$$K = \frac{K_m}{\sqrt{1 + \frac{1}{1 + \frac{2\,L_w}{L_g}}}}$$

Se considera $K_m = 1.2$. Ahora se determina la relación de esbeltez de la placa.

$$\frac{K\,L_w}{r} \leq 25 \qquad \rightarrow P_n = F_y\,A_g \tag{9}$$

Cuando $\frac{K\,L_w}{r} > 25$ se debe aplicar las disposiciones del capítulo E, del AISC 2010, que se indica a continuación.

$$\mathrm{F}_e = \frac{\pi^2 E}{\left(\frac{K L_g}{r}\right)^2} \tag{10}$$

Donde F_e es la resistencia elástica. Ahora se debe verificar la relación.

$$\frac{F_y}{F_e} \leq 2.25 \qquad \rightarrow \mathrm{F}_{cr} = \left[0.658^{\frac{Fy}{Fe}}\right] F_y \tag{11}$$

$$\frac{F_y}{F_e} > 2.25 \qquad \rightarrow \mathrm{F}_{cr} = 0.877\,F_e \tag{12}$$

Donde F_{cr} es el esfuerzo a compresión. Finalmente se tiene que la capacidad a compresión vale.

$$\emptyset\,P_n = \emptyset\,F_{cr}\,A_g \tag{13}$$

El factor $\emptyset = 0.9$. Por otro lado, se debe comprobar que la resistencia a compresión de placa Gusset sea mayor a la resistencia a la compresión de capacidad de la diagonal; caso contrario se deberá rediseñar.

2.5 Soldadura

Para el diseño de la conexión soldada entre la Placa Gusset y la viga inferior o columna, se utiliza el Método de Fuerzas Uniformes (MFU), para ello es necesario mirar la nomenclatura que se utilizará, la misma que se indica en la figura 5 a, y las fuerzas que se transmiten a las placas debido a la fuerza de tracción de la Placa Gusset, ver figura 5 b. Antes se debe indicar que se ha tomado como punto de trabajo wp, que es la intersección de los ejes de la viga y la columna.

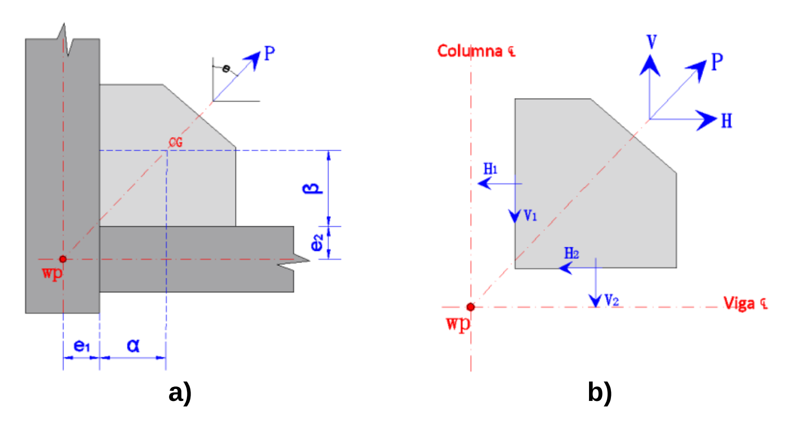


Figura 5. a) Parámetros del método de fuerzas tomando en cuenta como punto de trabajo *wp en la intersección de los ejes de la columna, viga y diagonal*, b) Diagrama de cuerpo libre.

El significado de las variables indicadas en la figura 5, es: α es la distancia desde la cara de la columna al centroide CG de la Placa Gusset para la conexión de la viga; β es la distancia desde la cara de la viga al centroide de la placa Gusset; e_2 es la profundidad media de la viga, e_1 es la profundidad media de la columna y ∅ es el ángulo de conexión de la diagonal.

Para la colocación de placas Gusset se utilizará soldadura de filete, para esto es importante tener en cuenta el área efectiva de una soldadura, la misma que depende del diámetro de soldadura, las siguientes ecuaciones proporcionan el espesor de soldadura para un determinado diámetro de soldadura.

$$D = \leq 10mm\,, t = D$$

$$D = \geq 10mm\,, t = 0.707D + 3mm$$

Donde D es el diámetro de soldadura a utilizar y t el espesor, ver figura 6.

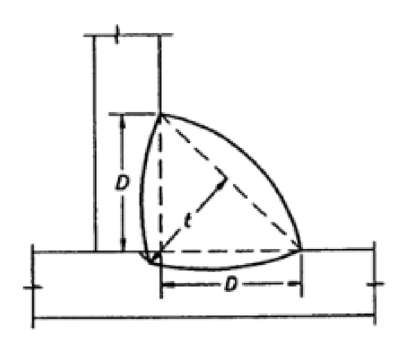


Figura 6. Nomenclatura para soldadura de filete en placas Gusset

A continuación se presenta el cálculo de las fuerzas que llegan a las placas sobre las que se apoya la Placa Gusset.

2.5.1 Placa que se une a la columna

$$V_1 = \beta \frac{P}{r} \tag{14}$$

$$H_1 = e_1 \frac{P}{r} \tag{15}$$

2.5.2 Placa que se une a la viga

$$V_2 = e_2 \frac{P}{r} \tag{16}$$

$$H_2 = \alpha \frac{P}{r} \tag{17}$$

De la figura 5 b, se tiene del equilibrio de fuerzas:

$$H = H_1 + H_2 \tag{18}$$

$$V = V_1 + V_2 \tag{19}$$

Para la distribución de la fuerza que se muestra en los diagramas de cuerpo libre de la figura 5, permanezca libre de momentos en los interfaces de conexión, la siguiente expresión debe cumplirse:

$$\alpha - \beta \tan\theta = e_2 * \tan\theta - e_1 \tag{20}$$

Dado que las variables de la derecha de la ecuación (20) están todos definidos por los miembros conectados (viga, columna y diagonal), el diseñador puede seleccionar valores de α y β para los que la ecuación sea verdadera.

Una vez que α y β han sido determinados, se halla r

$$r = \sqrt{(\alpha + e_1)^2 + (\beta + e_2)^2} \tag{21}$$

Luego de este proceso se trabaja con las fuerzas más altas tanto horizontales como verticales.

2.5.3 Capacidad de soldadura

Resistencia de la soldadura se obtiene mediante la siguiente ecuación

$$\emptyset\, R_n = \emptyset\, L_h\, D\, F_{nw} \tag{22}$$

Donde el factor $\emptyset$= 0.75; L_h es la longitud de la soldadura; D es el espesor efectivo de soldadura. F_{nw} es la resistencia nominal de la soldadura, la misma que se halla de la siguiente manera.

$$F_{nw} = 0.60 * F_{EXX} * (1 + 0.5 * seno^{1.5}\theta) \qquad (23)$$

Donde encontramos F_{EXX} es la resistencia de la soldadura, para electrodo E70XX, vale 492 MPa.; θ es el ángulo de carga, medido con respecto al eje X.

La fuerza nominal $\emptyset R_n$ tiene que ser mayor a las fuerzas que actúan en la interfase entre la placa y los elementos estructuras (viga y columna) denominados: V_1, H_1, V_2, H_2, Si no cumple se debe incrementar las dimensiones de la Placa Gusset para que la longitud de la soldadura sea mayor.

2.5.4 Revisión de la soldadura de conexión de sujetador a Placa Gusset

La resistencia al corte en el material base de la soldadura R_{sm}, se halla mediante la siguiente ecuación.

$$R_{sm} = \emptyset * F_{bm} * A_{bm} \qquad (24)$$

Donde el factor $\emptyset$=0.75; F_{bm} es la capacidad nominal del material base, depende del tipo de acero con el cual se trabaja.; A_{bm} es igual a area transversal del material base se obtiene multiplicando el espesor por la longitud del cordón de soldadura.

La resistencia al corte en el material de soldadura R_{sc}, se encuentra mediante la siguiente ecuación.

$$R_{sc} = \emptyset * F_w * A_w \qquad (25)$$

El valor del factor Φ ya fue indicado; F_w es la capacidad nominal del electrodo usado en soldadura; A_w es el área transversal del material base el cual es igual a la longitud de filete de soldadura por el espesor.

Una vez terminado la revisión al corte se vuelve a utilizar las ecuaciones (24) y (25), para la revisión a tensión, con la única diferencia que $\emptyset$=0.9.

Una vez terminado ambos procesos tanto como para cortante y tensión, se trabaja con los resultados más desfavorables que se denomina $\emptyset R_n$. La demanda viene dada por los valores V_1, H_1, V_2, H_2, multiplicados por $\emptyset$. En forma compacta se escribe.

$$\emptyset P_n \leq \emptyset R_n$$

2.6 Placas de continuidad

Para el diseño de las placas de continuidad normalmente se siguen recomendaciones generales. Los procedimiento para su diseño están basados en parámetros formales relacionados con las dimensiones de los perfiles vigas o columnas donde se colocaran. Un procedimiento más detallado podría emplearse para zonas donde existen valores notables de cargas concentradas, que posean un alto riesgo de pérdida de estabilidad local. En la sección J10 del ASIC 360-2010 se ilustran las comprobaciones a realizar. En estos casos, se recomienda determinar el valor de la capacidad resistente para la estabilidad local del alma y el ala superior con la carga aplicada del perfil, y comprobar la placa de continuidad para la combinación de esfuerzos que estas cargas locales puedan producir.

La fuerza resistente del ala está determinada por: $R_n = \emptyset 6.25 t_f^2 F_{yt}$ donde $\emptyset$ se toma como 0.90, t_f es el espesor del ala y F_{yt} es la tensión de fluencia mínima del ala en MPa.

Para el alma se tomará como resistencia: $R_n = \emptyset F_{yw} t_w (2.5K + l_b)$ donde $\emptyset$ se toma como 1.0, t_w es el espesor del alma y F_{yw} es la tensión de fluencia mínima del alma en MPa, k es la curvatura desde la cara exterior el ala y $l_b$es la longitud del apoyo.

Por regla general, el diseño se hace siguiendo las recomendaciones de la norma (NEC, 2015) donde se plantea que los espesores para placas de continuidad en alas de vigas deben seleccionarse teniendo en cuenta:

- Para conexiones exteriores, $t_{cp} \geq \frac{b_{vf}}{2}$
- Para conexiones interiores, $t_{cp} \geq b_{vf}$

Donde t_{cp} es el espesor de la placa de continuidad y b_{vf} es el ancho del ala de la viga.

Las recomendaciones sobre el diseño y la fabricación de estas placas, recogidas en la NEC 2015, establecen que se haga un recorte de las esquinas colocadas hacia el interior del perfil, menor de 38mm más allá de la zona k de curvatura para el contacto con el alma, y menor de 12mm en la zona de contacto con el ala.

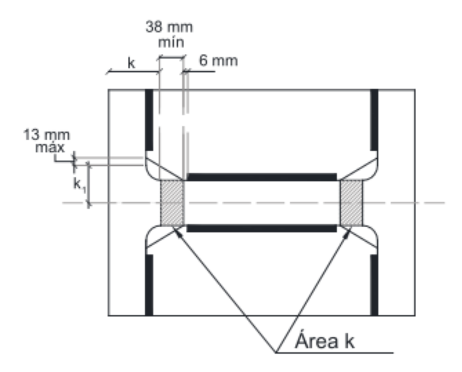


Figura 7 Biselado de la placa de continuidad Fuente: *NEC* (2015)

Es importante recordar que la colocación de las placas de continuidad crea un panel en al alma de la viga, por tanto, se deben realizar las comprobaciones incluidas en las normativas sobre este particular.

Cuando las placas Gusset están apoyadas directamente sobre elementos de hormigón armado, en ausencia de un marco regulatorio, según la Sección J8 del AISC 360-2010, se debe chequear el punzonamiento que la plancha de acero puede provocar sobre el elemento de hormigón, siempre y cuando estos estén sometidos únicamente a carga axial. Caso contrario, si en la placa están presente otros esfuerzos combinados, debe comprobarse además la capacidad resistente de la placa ante estos esfuerzos.

Para el caso de los contravientos especificados en este trabajo, solo se debería comprobar el punzonamiento de la placa en el elemento del hormigón, aunque adicionalmente se deben revisar los requerimientos establecidos al respecto por el ACI 318 y ACI 349.

El caso más desfavorable: cuando la menor de las áreas de la placa A_1 V se apoye en el elemento de hormigón, la resistencia al aplastamiento de diseño $\emptyset_c P_p$ se determina considerando $\emptyset_c = 0.65$ y;

$$P_p = 0.85 f_c' A_1 \sqrt{A_2/A_1} \leq 1.7 f_c' A_1$$

Donde A_2 es la máxima área de la porción de la superficie de apoyo que es geométricamente similar y concéntrica con el área de carga (cm^2) y f_c' es la resistencia a compresión especificada del hormigón del elemento de apoyo (MPa).

3. DISEÑO DE DIAGONAL DE CONTRAVIENTO

Si bien es cierto el marco teórico para el diseño de las diagonales de un contraviento en forma de “V” es general, no está demás indicar que se desarrolla el caso para una diagonal de acero redonda, cuyo diámetro exterior es L_b y su diámetro interior es L_{bi} que está insertado en la Placa Gusset inferior y superior una longitud L_1 y que ha sido soldada, de tal manera que no puede considerarse como que el elemento se encuentra empotrado-empotrado con lo que el factor de pandeo $K = 0.5$ pero tampoco se puede manifestar que el elemento se halla apoyado-apoyado con lo que $K = 1.0$; se decide trabajar con un valor intermedio $K = 0.75$. Por otra parte, se considera que la diagonal solo trabaja axialmente a compresión o tracción y se va a trabajar con el método LRFD (Load Resistance Factor Design) del AISC (2010)

3.1 Resistencia a la Tensión

Para que un pórtico sea considerado como especial y arriostrado concéntricamente debe cumplir con la siguiente condición.

$$\frac{K\,L}{r} \le 4\sqrt{\frac{E}{F_y}}$$

Donde K es el factor de pandeo; L es la longitud del elemento; r es el radio de giro; E es el módulo de elasticidad del material; F_y es el límite de fluencia del acero. El momento de inercia, área y radio de giro para un perfil redondo es:

$$I = \frac{\pi}{64}\,(L_b^4 - L_i^4)$$

$$A = \frac{\pi}{4}\,(L_b^2 - L_i^2)$$

$$r = \sqrt{\frac{I}{A}}$$

Para esta condición se tienen dos casos a considerar para definir la capacidad a Tensión y son los siguientes:

- **Fluencia del área bruta**

$$\emptyset\, R_n = R_y\, \emptyset\, F_y\, A_g \tag{26}$$

Donde $\emptyset = 0.9$; R_y es el factor de fluencia probable, para el acero ASTM A 36 este valor es igual a 1.3; el área bruta $A_g = A$.

- **Por fractura de la unión entre el elemento y la placa**

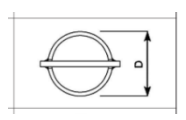
$$\emptyset\, R_n = R_y\, \emptyset\, F_u\, A_e \tag{27}$$

Donde $\emptyset = 0.75$; F_u es la resistencia última del acero; A_e es el área efectiva, para una sección redonda $A_e = UA_g$. La capacidad a tensión será el menor valor de las dos ecuaciones 26 y 27.

El factor U es el factor de corte diferido para elementos en tracción. Representa el retraso en la transmisión del esfuerzo en la zona de la conexión, cuando el total de área de la sección a tracción no colabora con la transmisión del esfuerzo, debido a la excentricidad de la conexión. Sus valores, recomendados en la sección D3 del AISC 360-2010, y resumidos en la tabla D3.1 de dicha sección establecen, para el caso de una placa Gusset central, empotrada en el perfil:

Si $L_1 \ge 1.3D$ entonces $U = 1.0$

Si $D \le L_1 < 1.3D$ entonces $U = 1 - \frac{\bar{x}}{L_1}$



Donde $\bar{x}$ es la excentricidad de la conexión y se calcula como $\bar{x} = \frac{D}{\pi}$

3.2 Resistencia a Cortante Vertical

Son las mismas ecuaciones indicadas en el apartado 2.2

3.3 Resistencia por bloque de cortante

La fluencia al cortante y fractura a tensión viene dada, por:

$$\emptyset R_n = \emptyset[0.6\, F_y\, A_{gv} + F_u\, A_{nt}]$$

La fluencia a tensión y fractura a cortante, viene dada, por:

$$\emptyset R_n = \emptyset[0.6\, F_u\, A_{nv} + F_y\, A_{gt}]$$

$$A_{nt} = A_{gt} = L_b\, t_p$$

$$A_{nv} = 2 * L_1 * t_p$$

$$A_{gv} = (L_1 + L_2)t_p$$

Estas ecuaciones ya fueron presentadas en el apartado 2.3, pero no se indicó en forma explícita el cálculo de las áreas.

3.4 Resistencia a la compresión

Para que una sección tubular sea compacta, se debe verificar lo siguiente:

$$\frac{L_b}{t} \leq 0.038\,\frac{E}{F_y} \qquad (28)$$

Donde L_b es el diámetro exterior (D); t es el espesor del tubo; el significado de las restantes variables ya se ha indicado. Para secciones compactas, la sección E.3 de AISC 360-2010 establece que:

Cuando: $\frac{KL}{r} \leq 4.71\sqrt{\frac{E}{F_y}}$ o $\frac{F_y}{F_e} \leq 2.25$ la tensión de pandeo se determina como:

$$\mathrm{F}_{cr} = \left[0.658^{\frac{Fy}{Fe}}\right] F_y$$

Donde: $\mathrm{F}_e = \frac{\pi^2 E}{\left(\frac{KL}{r}\right)^2}$

En el caso contrario, la tensión de pandeo toma el valor de:

$$\mathrm{F}_{cr} = 0.877 F_e$$

El cálculo de la capacidad a compresión es el siguiente:

$$\emptyset\, R_n = R_y\, \emptyset\, \mathrm{F}_{cr}\, A_g \tag{29}$$

Donde $\emptyset = 0.85; KL$ es la longitud efectiva de la diagonal; r es el radio de giro de la sección de la diagonal; A_e es el área efectiva; A_g es el área gruesa o bruta de la sección.

Para la determinación de la longitud efectiva KL es conveniente revisar las secciones E2 y Comentarios y el Anexo 7 y Comentarios del AISC 360-2010.

Si la sección no es compacta, se introduce en el cálculo el factor de reducción de rigidez Q que toma en cuenta todos los elementos no compactos. La sección E7 del AISC 360-2010 y sus Comentarios, realiza una explicación exhaustiva de los posibles valores que puede tomar este coeficiente y los procedimientos para determinarlos, y las modificaciones de las ecuaciones anteriores para casos particulares. De forma general, la capacidad a compresión se debe afectar por el factor de reducción.

$$\emptyset\, R_n = R_y\, \emptyset\, \mathrm{F}_{cr}\, A_g\, Q \tag{30}$$

Donde: $Q = \frac{A_e}{A_g}$

Otra aproximación al valor de Q, en el caso específico de perfiles tubulares circulares, cuando: $0.11 \frac{E}{F_y} < \frac{D}{t} < 0.45 \frac{E}{F_y}$,

$$Q = \frac{0.038E}{F_y({}^{D}/_{t})} + \frac{2}{3} \tag{31}$$

.

3.5 Para considerar el contraviento como un elemento tubular rectangular:

En el caso de perfiles tubulares armados (HSS), el procedimiento de diseño es similar a lo explicado anteriormente. Lo importante es establecer los requisitos de diseño que son diferentes o deben relacionarse de forma independiente.

Las disposiciones de la NEC (2015) establecen que la relación ancho-espesor de una sección sísmicamente compacta sea:

$$\frac{b}{t} \leq 0{,}55 \sqrt{\frac{E}{F_y}}$$

Donde b es el ancho del perfil medido en el interior y t es el espesor, dimensiones del perfil.

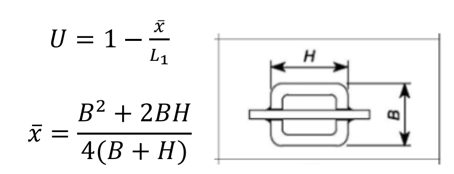
En otro sentido, la determinación de las áreas efectivas en fractura por tracción, teniendo en cuenta que las áreas brutas y netas coinciden por ser una conexión soldada, debe hacerse considerando el factor de corte diferido recomendado en la Tabla D3.1 de la Sección D (AISC, 2010).

El análisis del retraso por cortante que se puede producir en la zona de la conexión (AISC, 2010) en elementos rectangulares debe considerarse para la determinación del área efectiva de la capacidad de fractura en tensión. Si como es el caso, el perfil está conectado con una placa Gusset central, y la longitud de empotramiento de la placa l es mayor que el ancho del perfil: $\mathrm{l} \geq \mathrm{H}$,

Entonces sí $L_1 \geq H$:

$$U = 1 - \frac{\bar{x}}{L_1}$$

$$\bar{x} = \frac{B^2 + 2BH}{4(B + H)}$$



Donde $\bar{x}$ se considera la excentricidad de la conexión.

4. UN CASO DE APLICACIÓN

Se va a reforzar el Edificio Buzios, ubicado en la ciudad de Manta y que tiene 16 pisos, mediante dos tipos de disipadores de energía los denominados TADAS y los llamados Shear Link. Estos disipadores se van a colocar sobre contravientos de acero en forma de “V” invertida. En este apartado y acorde con el artículo se indica un solo vano en el que se detalla el cálculo de las Placas Gusset y de la diagonal.

Pero antes en la figura 8, se indica la geometría del disipador TADAS; en la figura 8 a, se aprecia el disipador (color amarillo) con las placas exteriores (color plomo); se denominan placas secundarias a las placas exteriores que se fijan mediante suelda continua a la estructura. En la figura 8 b, se aprecia al disipador sin las placas exteriores, luego de haber sido ensayado en el laboratorio de estructuras de la Pontificia Universidad Católica de Santiago de Chile. DITUC (2017). Antes de proseguir nótese que el disipador tiene 6 placas (Fig. 8 a) y que la forma de las placas son triangulares (Fig. 8 b) la forma triangular garantiza que toda la sección se va a plastificar en caso de un terremoto muy intenso (Tsai *et al.* 1993).

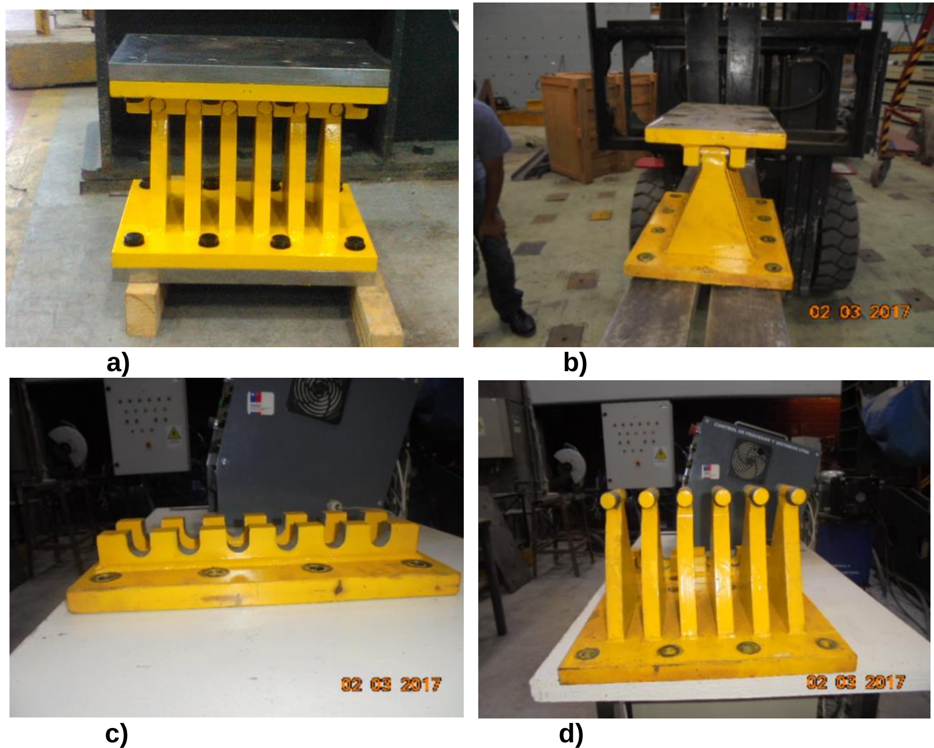


Figura 8 Descripción de disipador TADAS; a) Vista de disipador con las placas exteriores; b) Disipador TADAS sin las placas exteriores; c) Placa de Corte de disipador TADAS; d) Placa de Flexión de Disipador TADAS.

El disipador TADAS está compuesto por dos placas, la de corte que se indica en la figura 8 c, también conocida con el nombre de Peineta, por la forma que tiene y la Placa de flexión que se muestra en la figura 8 d, en la que se ve las placas triangulares y en la parte superior se tiene un cilindro el mismo que se inserta en los orificios de la peineta.

Esta geometría hace que cada placa triangular, que trabaja a flexión, este empotrada en su base y articulada en la parte superior (rodillo) que tiene un desplazamiento vertical y rotación cuando la placa trabaja a flexión. Aguiar *et al.* (2016, 4).

En la figura 9 se presenta la curva constitutiva que relaciona el desplazamiento lateral con la fuerza horizontal aplicada, encontrada en el ensayo del disipador indicado en la figura 8. Se llegó a un desplazamiento lateral de 45 mm, asociado a una fuerza lateral de 32 T. Se destaca que el disipador no sufrió daño, lo que demuestra la bondad del mismo y de igual forma se observa que no existe degradación de rigidez en la descarga y que la resistencia se incrementa conforme se aumenta el desplazamiento, esto implica mayor disipación de energía; de igual manera se observa que la deformación que existe al cambiar de carga en un sentido a carga en el otro sentido, es mínima. En fin el disipador TADAS tiene un excelente comportamiento sísmico.

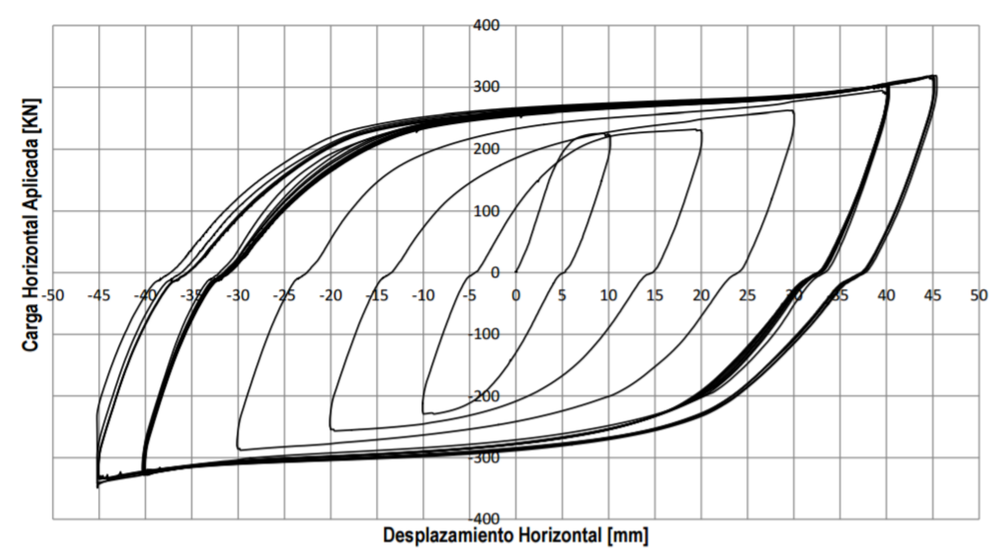


Figura 9 Curva constitutiva de disipador TADAS hallada experimentalmente.

Antes de reforzar el edificio Buzios, se realizó un estudio de peligrosidad sísmica y se determinaron dos espectros: el de diseño DBE, que tiene un período de retorno de 475 años y el sismo máximo considerado MCE, con un período de retorno de 975 años. Rivas (2016).

Los disipadores de energía, las diagonales del contraviento, las placas Gusset y las placas de continuidad se diseñan para el sismo máximo considerado MCE. Para ese evento se espera un desplazamiento en los disipadores de 40 mm, que está asociado a una fuerza lateral de 30 T, ver figura 8. Aguiar (2017).

Por lo tanto, se considera que las diagonales del contraviento están sometidas a esta fuerza de 30 T., tanto en tracción como en compresión. Se llega a un valor similar al realizar un análisis estático considerando las fuerzas laterales, debidas al sismo MCE y la carga vertical del estado de carga 1.2 D +L. Siendo D, la carga permanente y L, la carga transitoria. Aguiar (2017)

4.1 Descripción de los elementos de un Panel

En la figura 10 se observa uno de los vanos en los cuales se colocarán dos disipadores de energía TADAS sobre contravientos con diagonales redondas de 6’’ de diámetro interior y 11 mm, de espesor. Las placas de continuidad que van en la columna y la viga se han denominado P5 y P6; la Placa Gusset inferior PG1 y la Placa Gusset superior PG2, sobre esta existe una placa horizontal P7 sobre la que van los disipadores y encima se encuentra la placa P8.

En este artículo se ilustra el cálculo de las Placas PG1, PG2 y de la diagonal del contraviento, pero no está por demás indicar que la placa secundaria del disipador (de color plomo en la figura 8 a) que tiene 2.5 cm, se espesor de suelda a la placa P7, como se observa en la figura 11, con un electrodo E70 XX, sobre esta placa va el disipador que también tiene una placa de 2.5 cm, de espesor; estas dos placas se unen mediante 8 pernos de 5/8’’ que se ven en la figura 7 a.

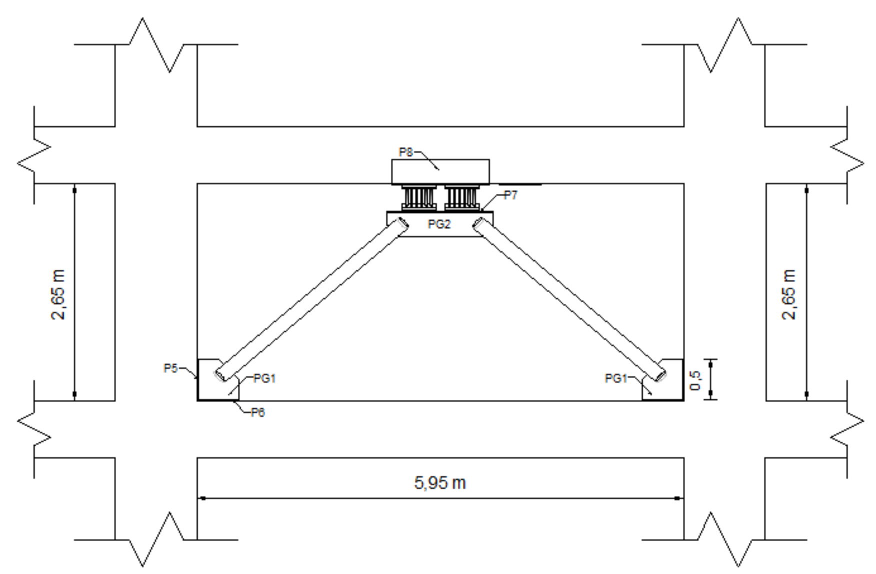


Figura 10 Disipadores de energía TADAS sobre contravientos en forma de "V" invertida. Fuente: Aguiar (2017)

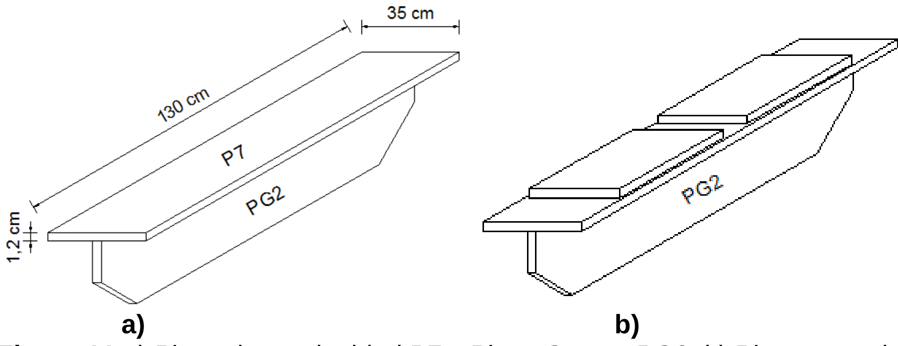


Figura 11 a) Placa de continuidad P7 y Placa Gusset PG2; b) Placas exteriores del disipador TADAS con suelda continua a Placa P7. Fuente: Aguiar (2007).

La placa de continuidad P8 tiene una forma de "C" y se ha utilizado un adhesivo químico Simpson para los anclajes que se colocarán en los lados verticales de la viga.

4.2 Placas Gusset PG1 y PG2

En la tabla 1, se indica las dimensiones finales de las Placas Gusset, inferior y superior, las dos tienen un espesor $t_p = 1.2\ cm$, y el tubo redondo de 6'' de diámetro interior va inmerso por sus extremos de las placas $L_1 = 15\ cm$. La longitud de la placa inferior es de 50/50 cm, y la superior es de 130/30 cm.

Con estas dimensiones la capacidad de las placas, que se hallan al aplicar los formularios descritos en el apartado 2, son las indicadas en la tabla 2. Como se había indicado la demanda a tracción y compresión en la diagonal es de 30 T. Por lo tanto, se observa en la tabla 2, que la capacidad de las mismas es mayor que la

demanda. Lo que garantiza que ante el sismo máximo considerado van a trabajar satisfactoriamente estas dos placas.

Tabla 1 Dimensiones de las Placas Gusset para ejes C-D

Placa Gusset	L_h (cm)	L_v (cm)	L_1 (cm)	L_2 (cm)	t_p (cm)
Inferior	50	50	15	34.10	1.2
Superior	130	30	15	19.86	1.2

Tabla 2 Capacidad de la Placas Gusset para ejes C-d

Alternativa	Tensión (T.)	Corte (T.)	Bloque Corte (T.)	Compresión (T.)
Inferior	95.09	89.56	129.29	64.70
Superior	95.09	63.58	127.20	85.65

En la placa PG1 no se va a utilizar collarín por lo que la fijación de las mismas vendrá dada por anclajes químicos.

4.3 Diseño de la diagonal

Ahora, al aplicar el formulario indicado en el apartado 3, para encontrar la capacidad del tubo de 6’’ de diámetro interior, la capacidad que se tiene, se indica en la tabla 3. Como era de esperarse la capacidad tanto a tensión, corte y compresión es mayor que la demanda (30 T.) por lo que el diseño se considera satisfactorio.

Tabla 3 Capacidad de tubo de 6’’ a tensión y compresión

Valor de L_2 de P. Gusset	Tensión (T.)	Corte (T.)	Bloque Corte (T.)	Compresión (T.)
19.86 cm (Superior)	167.14	63.50	105.80	148.77
34.1 cm (Inferior)	167.14	89.44	105.80	148.77

Al comparar las tablas 2 y 3, se ve que la diagonal tiene mayor capacidad a tensión que la placa Gusset, habría sido mejor si era al revés; al corte tienen los mismos valores; en el bloque de corte, las placas Gusset tienen mayor capacidad; y, finalmente a compresión la diagonal tiene mayor capacidad.

Es importante destacar que las diagonales van a estar trabajando aproximadamente a un 25% de su capacidad y esto es muy ventajoso ya que de esta forma se garantiza que estos elementos van a trabajar en el rango elástico durante el sismo máximo considerado y de esa forma son los disipadores los que van a liberar la energía sísmica.

5. COMENTARIOS Y CONCLUSIONES

Se ha presentado, desde un punto de vista práctico, el marco teórico para calcular las Placas Gusset, inferior y superior, de un contraviento con tubos de acero que van inmersos en las placas. De igual manera se ha indicado la teoría para calcular este tipo de diagonal, la misma que trabaja axialmente.

Como caso de aplicación, se muestra el diseño de los elementos estructurales indicados en el párrafo anterior, a un vano de un pórtico del edificio Buzios que será reforzado con disipadores de energía TADAS y Shear Link. A más de ello se indican los detalles constructivos, aplicados a la colocación de los disipadores TADAS.

Con todo lo expuesto en este artículo se aspira aportar al desarrollo del reforzamiento sísmico de estructuras.

REFERENCIAS

1. ACI (2008), Building Code Requirements for Structural Concrete, ACI 318-08 and ACI 318M-08, American Concrete Institute, Farmington Hills, MI.
2. AISC Committee. (2010). Specification for Structural Steel Buildings (ANSI/AISC 360-10). *American Institute of Steel Construction, Chicago-Illinois*.
3. Aguiar R., Izurieta C., Gómez G., Salvador R., Rivera O., Carpio H., (2011), "Estudio de la Vulnerabilidad Sísmica de los Centros Educativos Municipales en el Distrito Metropolitano de Quito", PLANMAN Fase A. Secretaría de Seguridad y Gobernabilidad.
4. Aguiar R., (2017) *Memoria de cálculo del reforzamiento sísmico de Edificio Buzios con disipadores de energía TADAS y Shear Link.* Administración de Edificio Buzios, 115 p., Manta.
5. Aguiar R., Zevallos M., Palacios J., García L., Menéndez E., (2016, 1), *Reforzamiento de estructuras con disipadores de energía. Terremoto de Ecuador del 16 de abril de 2016.* Instituto Panamericano de Geografía e Historia, IPGH, Primera Edición, 287 p. Quito.
6. Aguiar R., Silva H., y Coyago H., (2016, 2) "Desarrollo de un programa en Excel para diseñar Placas Gusset. Aplicación a una estructura con disipadores de energía de UFA-ESPE", *Revista Ciencia,* 18 (3), 353-380. http://www.revista_ciencia.espe.edu.ec
7. Aguiar R., Bozzo L., Mora D., Silva H., Caiza P., Coyago H., (2016,3), "Protocolo de instalación de disipadores Shear Link Bozzo SLB40_3 y placas Gusset en Bloque Estructural 4 de la UFA-ESPE", *Revista Internacional de Ingeniería de Estructuras,* 21 (2), 127-150.
8. Aguiar R., Rodríguez M., Mora D., (2016, 4), *Análisis sísmico de estructuras con disipadores ADAS o TADAS.* Centro Internacional de Métodos Numéricos en Ingeniería CIMNE IS-73, 174 p., Barcelona, España.

9. Almazán J.L., (2017) Asesoría sobre disipadores de energía TADAS. Santiago de Chile.
10. DICTUC (2017), *Ensayo cíclico disipador de energía TADAS.* DICTUC S.A. Laboratorio de Ingeniería de Estructuras. Informe N. 1398367, 15 p. Santiago de Chile.
11. Dowswell, B. (2011). Connection Design For Steel Structures, Structural Design Solutions.
12. Kotulka, B. A. (2007). Analysis for a design guide on Gusset Plates used in Special Concentrically Braced Frames. University of Washington.
13. NEC-15 (2015) *Norma Ecuatoriana de la Construcción. NEC-SEHM, Estructuras de Acero.*
14. Munse, W. H., & Chesson, E. (1963). Riveted and bolted joints: net section design. *Journal of the Structural Division*, *89*(1), 107-126.
15. Rivas A., (2016) *Caracterización probabilística de la peligrosidad sísmica en dos sitios de interés, Manta y Bahía de Caráquez (Ecuador),* Informe de 21 p., Manta.
16. Tsai K-C, Chen H-W, Hong C-P, y Su Y-F, (1993), “Design of stell triangular plate energy absorbers for seismic-resistant construction”, *Earthquake Spectra,* 9 (3), 505-528.